

Квантово-подобные модели опознания, принятия решений и связывания понятий

Б.И. Беспалов

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Факультет Психологии
bespalovb@mail.ru

Аннотация: В статье описаны некоторые квантово-подобные модели процессов опознания, принятия решений и связывания понятий. В этих моделях результаты экспериментальных исследований познавательных процессов объясняются с помощью представлений об амплитудах вероятностей их осуществления разными путями и способами, представлений о суперпозиции и интерференции этих амплитуд вероятностей. Описана разрабатываемая нами квантово-подобная модель процесса зрительного опознания объектов по заданному свойству E в хронометрическом эксперименте. Она основана на математическом обобщении сферической нейросетевой модели зрительного анализатора, предложенной С.В. Фоминым, Е.Н. Соколовым и Г.Г. Вайткавичусом (1979, 1989). В рассмотренной квантово-подобной модели опознавательного действия каждому воспринимаемому или воображаемому свойству E опознаваемого объекта соответствует оператор типа \hat{H} или \hat{H} . Собственные значения E_q и E_k этих операторов описывают воспринимаемые или воображаемые (эталонные) значения данного свойства. Данные операторы являются аналогами энергетического оператора Гамильтона в квантовой физике. Психологический аналог уравнения Шредингера $d\Psi/dt = (-i/p)\hat{H}\Psi(t)$ описывает «эволюцию», или изменение во времени состояния $\Psi(t)$ системы опознавательных эталонов, происходящее при ожидании тестового объекта. Входящая в это уравнение буква p обозначает порог различения субъектом значений свойства E . Процесс «сличения» образа тестового объекта с эталонами соотносится в модели с квантово-подобной редукцией вектора состояния $\Psi(t)$ системы эталонов. Он рассмотрен на примере мысленного вращения зрительного образа тестового объекта к соответствующему опознавательному эталону.

Ключевые слова: квантово-подобные модели познания, квантовая вероятность, психологическое уравнение Шредингера

Quantum-like models of recognition, decision making and linking concepts

B.I. Bespalov

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Psychology
bespalovb@mail.ru

Abstract: The article describes some quantum-like models of the processes of recognition, decision making and concept binding. In these models, the results of experimental studies of cognitive processes are explained by means of concepts about the amplitudes of the probabilities of their realization by different ways, and the interference of these probability amplitudes. We describe the quantum-like model of the process of visual identification of objects in the chronometric experiment that we are developing. It is based on a mathematical generalization of the spherical neural network model of the visual analyzer, proposed by S. Fomin, E. Sokolov and G. Vaitkevicius (1979, 1989). In the quantum-like model of recognition, each perceived or imaginary property E of an identifiable object corresponds to an operator of type \hat{H} or \hat{H} . The eigenvalues E_q and E_k of these operators describe the perceived or imaginary (standards) values of this property. These operators are analogous to Hamilton's energy operator in quantum physics. The psychological analogue of the Schrödinger equation is the equation $d\Psi/dt = (-i/p)\hat{H}\Psi(t)$. It describes the "evolution" in time of the

state $\Psi(t)$ of the system of identification standards that occurs when the test object is waiting. The letter p denotes the threshold for distinguishing the values of the property E . The process of quantum-like reduction of the state vector $\Psi(t)$ of the system of identification standards is considered using the example of the mental rotation of the visual image of the test object to the corresponding identification standard.

Keywords: quantum-like models of cognition, quantum probability, psychological Schrödinger equation

Отличительной особенностью квантово-подобных моделей познавательных процессов и сознания человека является то, что в них используются идеи, понятия и математические конструкции из квантовой физики, в которой в математической форме описан один из познавательных процессов, включающий взаимодействие познаваемых предметов (микрообъектов) с физическими инструментами познания (приборами). Функциональное и структурное сходство этого процесса с изучаемыми в психологии процессами обнаружения и опознания обычных предметов, его сходство с процессом принятия решения о принадлежности предмета к определенному классу, служит одним из обоснований возможности переноса в психологию математического аппарата квантовой физики. Необходимость в разработке квантово-подобных психологических моделей обусловлена также накоплением в психологии большого массива экспериментальных данных, свидетельствующих о нарушении в психологических экспериментах с людьми законов булевой логики и классической теории вероятностей (формулы полной вероятности и др.), что установлено в работах А. Тверски, Д. Канемана, Е. Шафиро и др. (Khrennikov, 2009). Это требует привлечения в психологию новых для нее представлений об амплитудах вероятностей осуществления психологических процессов различными способами и путями, об интерференции этих амплитуд и пр. Краткий обзор применения этих понятий в современной «квантовой психологии познания» дается ниже. Во второй части статьи описаны некоторые идеи квантово-подобной модели зрительного опознания объектов, разрабатываемой нами на основе математического обобщения сферической нейросетевой модели зрительного анализатора, предложенной С.В. Фоминым, Е.Н. Соколовым и Г.Г. Вайткявичусом (1979, 1989).

Одна из типичных квантово-подобных психологических моделей с помощью амплитуд вероятностей объясняет результаты экспериментов, в которых нарушается формула полной вероятности последовательных событий. Испытуемым показывали изображения мужских лиц, которые варьировались по форме лица (от узкой до широкой) и по толщине губ (Busemeyer, Wang, 2015). В задаче **C** (categorization) испытуемые *осознанно* относили лица к одной из двух категорий (G – «хорошие парни» или B – «плохие парни»). В задаче **D** (decision-making) они принимали решение о том, действовать ли по отношению к ним дружелюбно (F) или агрессивно (A). Эти задачи каждому испытуемому предъявлялись в 4-х экспериментах: 1) **C–D** (вначале производилась категоризация, потом решение о действии), 2) **D – C** (наоборот), 3) **C-alone** (только категоризация), 4) **D-alone** (только решение о действии).

Оказалось, что результаты этих экспериментов не согласуются с формулой полной вероятности. Так, если в эксперименте **D-alone** полную вероятность, например, агрессивного (A) действия по отношению к тестовым лицам f рассчитывать по классической формуле: $Pr(A/f) = Pr(A/G) \cdot Pr(G/f) + Pr(A/B) \cdot Pr(B/f)$, то получается число 0,59, тогда как эксперимент показал 0,69. (Вероятности из правой части этой формулы рассчитываются по результатам первого и третьего экспериментов). Для объяснения данного расхождения авторы предположили, что в эксперименте **D-alone** испытуемые «принимают решение» об агрессивном или дружеском поведении в отношении показанных лиц путем «скрытого вывода».

Такое «принятие решения» можно трактовать как осознанный выбор испытуемыми действия A или F в отношении показанного лица, при совершении которого испытуемые «неявно» учитывают свои оценки данного лица как *возможно* хорошего (G) и *возможно*

плохого (B). В данной ситуации эти оценки *осознанно не различаются* (либо G , либо B) и *не реализуются* в форме осознаваемого эмоционального или словесного акта. Такая фактическая не различимость двух логически альтернативных путей решения задачи **D-alone** в некотором отношении подобна фактической не различимости двух возможных путей прохождения микрообъекта через щели физического анализатора, после которого на экране детектора возникает «интерференционная картина». Для ее объяснения в физике суммируют комплексные «амплитуды вероятностей» прохождения микрообъекта через две возможные щели.

Когда психологические оценки лиц как G и B осознанно не различаются, но имеются в виду в скрытой форме, для расчета полной вероятности выбора действия A также нужно складывать и возводить в квадрат амплитуды вероятностей разных путей решения задачи, т.е. использовать квантово-подобную модель выбора, или принятия решения о действии A :

$$\begin{aligned} Pr(A/f) &= |\langle A/f \rangle|^2 = |\langle A/G \rangle \langle G/f \rangle + \langle A/B \rangle \langle B/f \rangle|^2 = \\ &= |\langle A/G \rangle \langle G/f \rangle|^2 + |\langle A/B \rangle \langle B/f \rangle|^2 + 2|\langle A/G \rangle \langle G/f \rangle \langle A/B \rangle \langle B/f \rangle| \cdot \cos(\theta) \end{aligned}$$

Интерференционный член, содержащий сомножитель $\cos(\theta)$, позволяет объяснить наблюдаемую вероятность выбора действия A в эксперименте **D-alone**. Аналогичным образом вычисляются и «объясняются» другие полные вероятности: $Pr(F/f)$, а также вероятности категоризации лиц в эксперименте **C-alone** - $Pr(G/f)$ и $Pr(B/f)$. Предполагается, что в этом эксперименте испытуемые при категоризации лиц как хороших G или плохих B в не осознанной, «скрытой» форме учитывают свое дружеское или агрессивное отношение к ним.

В других работах (Pothos, Busemeyer, 2009, Bruza et al., 2015) разработана квантово-подобная модель принятия людьми решений в игре «Дилемма Узника», а также в «двухстадийных» азартных играх. Были построены комплексные функции ψ_{ij} (амплитуды вероятностей), образующие суперпозицию и описывающие стратегии игроков в таких играх - их представления о способах своих действий (j) в зависимости от возможных действий противника (i). С помощью «функций полезности» была построена специфичная для игры «Дилемма Узника» матрица когнитивного оператора H , входящего в динамическое уравнение $d\psi/dt = -iH\psi$, которое является психологическим аналогом уравнения Шредингера в квантовой физике. На основе матрицы оператора H были вычислены вероятности выбора двумя игроками различных стратегий поведения в этой игре в условиях знания и не знания ими намерений соперника. Результаты этого расчета позволили достаточно хорошо аппроксимировать имеющиеся экспериментальные данные. Параллельно с квантовой моделью данной игры в работе по той же схеме строилась классическая (Марковская) модель принятия решений, в которой нет квантово-подобной суперпозиции разных способов решения задач испытуемыми. Марковская модель существенно расходится с эмпирическими данными.

Бельгийские психологи и математики под руководством Д. Аертса (Aerts et al., 2013) проанализировали результаты большого числа когнитивных экспериментов с понятиями и показали, что способы их комбинирования в языке и принятие решений об их смысле не могут быть адекватно описаны классической логикой и теорией вероятностей. С помощью математического аппарата квантовой механики и квантовой теории поля они разработали проверяемые в эксперименте модели формирования смысла «составных» понятий (образованных сочетанием ряда слов), а также модель понимания смысла конъюнкции и дизъюнкции пар различных понятий. В статье (Aerts, Sozzo, 2011), построена эмпирически проверяемая модель влияния контекста на понимание смысла слов. В ней введено представление о квантово-подобном «состоянии понятия» и использован математический аппарат (тензорное произведение пространств и пр.), описывающий «квантовую запутанность» (entanglement) этих состояний.

В классической когнитивной теории понятий они рассматривались как «формы фиксированных ментальных репрезентаций». Для изучения того, как люди связывают различные понятия в осмысленные цепочки, были разработаны количественные показатели их «концептуальной близости», основанные на теории нечетких множеств и пр. Однако эти показатели оказались зависимыми от контекста и изменялись при сравнении понятий в

различных ситуациях. Например, оценки по семибальной шкале «Ковбойской шляпы» как типичного представителя ШЛЯПЫ (вообще) зависят от контекста, который задается такими предложениями, как «Носится для забавы», «Носится для защиты», «Носится на юге» и пр. При измерении типичности таких объектов как «Золотая рыбка» и «Гуппи» относительно таких понятий, как «Домашнее животное», «Рыба» и их конъюнкции «Домашняя Рыба» было обнаружено, что степень типичности этих объектов значительно больше для «составного» понятия «Домашняя Рыба», чем для отдельных понятий «Домашнее животное» и «Рыба». Это также не согласуется с классической нечетко-множественной концепцией понятий, согласно которой степень типичности объекта для конъюнкции двух понятий не должна превышать показатель его типичности для каждого понятия в отдельности. Эти и другие многочисленные факты не находят удовлетворительного объяснения в рамках репрезентационной теории понятий.

В квантово-подобной модели понятий, разработанной Д. Аертсом и др., перечисленным фактам дается новое объяснение. В ней предполагается, что контекст понятия *активно влияет* на его понимание. В этой концепции понятие отождествляется со значением слова, которое выясняется (*emerges*) в процессе взаимодействия между словом и его контекстом. Когда контекст не оказывает влияния на стоящее за словом понятие, то оно находится в *потенциальном состоянии*, которое представляет собой *суперпозицию* множества потенциально-возможных значений этого слова. Потенциальное состояние понятия описывается с помощью *суперпозиции* единичных базисных векторов Гильбертова пространства, а влияние контекста моделируется линейными операторами, действующими в этом пространстве. Взаимодействие такой суперпозиции с определенным контекстом приводит к её «редукции» к одному из *актуальных* состояний понятия, в котором входящие в него признаки предмета и его «потенциальные ассоциации» становятся вполне определенными (Aerts et al., 2009).

Далее кратко рассмотрим квантово-подобную модель зрительного опознавания объектов, которая разрабатывается нами на основе математического «расширения» сферической нейросетевой модели зрительного анализатора, описанной в работах (Фомин и др. 1979, Соколов, Вайткявичус, 1989). В нейросетевой модели опознавательного действия состояние опознаваемого объекта на разных уровнях нейронной сети описывается выходными векторами соответствующих нейронных ансамблей - формальных рецепторов, преддетекторов, детекторов, нейронов памяти, командных и мотонейронов (Беспалов, 2014). При зрительном опознавании объекта по свойству E испытуемый вначале определяет значение E_q этого свойства, а затем «сличает» его с опознавательными эталонами, которые формируются при ознакомлении с тестовыми объектами и хранятся в «рабочей» памяти. С каждым эталоном с помощью инструкции соотнесен определенный вербальный или двигательный ответ, с помощью которого предъявленный объект относится к определенной категории. В хронометрическом эксперименте регистрируется длительность опознавания, которая равна времени от начала предъявления объекта до ответа о его категории.

В нейросетевой модели зрительного опознавания объекта по заданному свойству (длина линии, ориентация фигуры, ее форма и пр.), состояние объекта на выходе ансамбля из двух преддетекторов описывается единичным, нормированным вектором:

$$\mathbf{F}_q = \cos(\lambda E_q) \mathbf{e}_1 + \sin(\lambda E_q) \mathbf{e}_2,$$

где E_q – значение свойства опознаваемого объекта, λ – константа, определяющая чувствительность анализатора, \mathbf{e}_1 и \mathbf{e}_2 – единичные векторы двух формальных преддетекторов, которым соответствуют нейроны в латеральном колленчатом теле мозга. (Двух преддетекторов достаточно для того, чтобы нейронная сеть могла обнаруживать объекты, предъявляемые в рецептивном поле этих преддетекторов, а также опознавать их по значениям одного свойства).

Вектор \mathbf{F}_q с координатами $f_q^1 = \cos(\lambda E_q)$ и $f_q^2 = \sin(\lambda E_q)$, описывающими величину активации выхода каждого преддетектора, поступает на синаптические входы формальных детекторов, которым соответствуют биологические нейроны, расположенные в первичной зрительной коре мозга. Вход каждого детектора характеризуется вектором синаптических коэффициентов \mathbf{P}_k , который описывает состояние i -синапсов на входе k -го детектора и имеет

координаты p_{ki} в базисе векторов синаптических коэффициентов \mathbf{e}^1 и \mathbf{e}^2 . Этот базис в данной модели является двойственным к базису выходных векторов ансамбля преддетекторов \mathbf{e}_1 и \mathbf{e}_2 в том смысле, что $\mathbf{e}^i(\mathbf{e}_k) = \delta_{ik}$ (где δ_{ik} символ Кронеккера, равный 1 при $i = k$ и 0 при $i \neq k$). При действии вектора \mathbf{e}^i на вектор \mathbf{F}_q он выделяет его i -ю координату, т.е. отображает этот вектор в число: $\mathbf{e}^i(\mathbf{F}_q) = f_q^i$. Поэтому базисные векторы \mathbf{e}^i являются линейными функционалами. Их линейная комбинация, т.е. вектор $\mathbf{P}_k = p_{k1}\mathbf{e}^1 + p_{k2}\mathbf{e}^2$ также принадлежит евклидовому пространству линейных функционалов, которое двойственно к евклидовому пространству векторов \mathbf{F}_q .

Это позволяет в сферической нейросетевой модели использовать символы векторов, предложенные Дираком в квантовой физике. С их помощью линейные функционалы \mathbf{P}_k в евклидовом пространстве, описывающие синаптические входы детекторов, по аналогии с функционалами гильбертова пространства в физике обозначаются нами как $\langle \mathbf{P}_k |$ и называются бра-векторами. Векторы двойственного ему пространства называются кет-векторами и обозначаются символом $|\mathbf{F}_q\rangle$. Тогда выход d_{kq} k -го детектора можно представить как действие функционала $\langle \mathbf{P}_k |$ на выходной вектор $|\mathbf{F}_q\rangle$ ансамбля из двух преддетекторов:

$$d_{kq} = \langle \mathbf{P}_k | \mathbf{F}_q \rangle = \sum_{i=1}^2 p_{ki} \cdot f_q^i$$

Поскольку детекторы из одного ансамбля имеют различные векторы синаптических коэффициентов \mathbf{P}_k , то при их действии на один и тот же входной вектор \mathbf{F}_q выходы этих детекторов также будут различны. Однако среди детекторов одного ансамбля (соответствующего, по-видимому, одной макроколонке нейронов в первичной зрительной коре) может найтись такой предварительно «обученный» или настроенный q -й детектор, выход которого максимален в данном ансамбле и при нормировке векторов $\langle \mathbf{P}_k |$ равен единице: $d_{qq} = +1$. В этом случае выражаемые *действительными* числами одноименные координаты векторов $\langle \mathbf{P}_q |$ и $|\mathbf{F}_q\rangle$ равны. (Из этого, однако, не следует, что угол между ними равен 0° . Эти векторы принадлежат к разным, взаимнодвойственным пространствам, между которыми нет «канонического» изоморфизма, не зависящего от выбора базисов. Поэтому, строго говоря, скалярные произведения и углы между этими векторами не определены).

В сферической нейросетевой модели предполагается, что формальная нейронная сеть определяет значение свойства E_q по номеру или местоположению максимально возбужденного детектора на «детекторной карте», или в некотором ансамбле детекторов, в разной степени активированных вектором \mathbf{F}_q (Фомин и др. 1979, Соколов, Вайтквичус, 1989). Однако возможный «механизм» выделения нейронной сетью максимально возбужденного детектора в этих работах детально не описан. Это не позволяет ответить на вопросы о том, для чего, как и при каких условиях выделяется максимально возбужденный детектор и обнаруживается соответствующее ему свойство объекта E_q , а также что при этом происходит с другими активированными нейронами ансамбля? Сохраняют ли они свою активацию еще некоторое время после выделения максимально возбужденного нейрона или же акт выделения такого детектора приводит к «мгновенной» деактивации других детекторов ансамбля? Последнее напоминало бы редукцию «волновой функции», или вектора состояния физического микрообъекта, происходящей в «щелевом эксперименте» вблизи детекторного экрана при измерении координаты объекта.

Отвечая здесь на последний из поставленных выше вопросов, отметим, что выход всего ансамбля из k детекторов в соответствии с общей схемой описывается новым вектором $\mathbf{D}_q = \sum d_{kq} \mathbf{j}_k$, где \mathbf{j}_k единичные выходные векторы детекторов, а d_{kq} – величина активации k -го детектора вектором \mathbf{F}_q при поступлении на рецепторы объекта со свойством E_q . Тогда возможная модель механизма обнаружения нейронной сетью свойства E_q могла бы включать «редукцию» вектора \mathbf{D}_q , или его отображение (проекцию) на направление выходного вектора максимально возбужденного детектора: $\mathbf{D}_q \rightarrow d_{qq} \mathbf{j}_q$. Однако такая редукция не является квантово-подобной, поскольку в физике речь идет о редукции суперпозиции (суммы) *возможных* состояний микрообъекта к одному *действительному* состоянию, тогда как в ансамбле формальных детекторов все нейроны активируются одновременно и переходят в «действительное» состояние активации.

В связи с этим, в сферической нейросетевой модели зрительного анализатора человека, (включающего рецепторы сетчатки, преддетекторы в латеральных колленчатых телах и детекторы в первичной зрительной коре) предполагается, что его нейронная сеть функционирует по законам классической физики и теории вероятностей. Это предположение не исключает того, что более сложные нейронные сети, включающие мнемические нейроны или «нейроны сознания» (по Е.Н. Соколову) могут функционировать по другим законам и описываться квантово-подобными моделями, некоторые идеи и элементы которых уже обсуждаются в литературе.

Разработанные к настоящему времени сферические нейросетевые модели зрительного опознавания объектов (Соколов, Вайткявичус, 1989; Беспалов, 2014) можно рассматривать как формализованные описания преимущественно *нейрофизиологических* механизмов этого процесса. Однако достаточно сложные и осознанно выполняемые опознавательные действия человека имеют также *психологические* механизмы осуществления, изучаемые в многофакторных хронометрических экспериментах. Эти механизмы связаны с процессами установления и реализации испытуемым *смысловых отношений* между зрительно воспринимаемыми тестовыми объектами и совокупностью осознанных и хранящихся в памяти опознавательных эталонов, с процессами зрительного выделения опознавательного признака (значения свойства) объекта и его «сличения» с эталонами, с процессом организации двигательных ответов на объекты и пр. Для формализованного описания этих процессов и построения их экспериментально проверяемых моделей может использоваться тот же математический аппарат комплексной линейной алгебры, который применяется в квантовой физике. Однако поскольку психологические процессы, средства и способы опознавательных действий человека должны иметь соответствующие им нейрофизиологические механизмы, то разрабатываемые с помощью указанного аппарата квантово-подобные модели опознавания должны быть математически связаны с нейросетевой моделью этого же процесса.

Как отмечено нами ранее (Беспалов, 2010), переход от нейросетевой к квантово-подобной модели опознавания можно осуществить путем «комплексификации» векторов \mathbf{F}_q и \mathbf{P}_k и введения в них временного параметра t . Тогда *психологическое состояние* тестового объекта со свойством E_q , *порождаемое субъектом с помощью* ансамбля из двух преддетекторов, будет описываться комплексным и единичным по длине кет-вектором:

$$|\mathbf{F}_q(t)\rangle = (\cos(\lambda E_q t) + i \sin(\lambda E_q t))|e_q\rangle = e^{i\lambda E_q t}|e_q\rangle,$$

Психологическое состояние каждого опознавательного эталона описывается комплексно сопряженными бра-векторами:

$$\langle \mathbf{P}_k(t) | = (\cos(\lambda \hat{E}_k t) - i \sin(\lambda \hat{E}_k t)) \langle e^k | = e^{-i\lambda \hat{E}_k t} \langle e^k |$$

В этих формулах константа λ описывает дифференциальную чувствительность *субъекта* к значениям свойства E , которая обратно пропорциональна порогу осознанного различения субъектом этих значений: $\lambda \approx 1/p$. (В нейросетевой модели константа λ описывает чувствительность анализатора). Символами $\langle e^k |$ и $|e_q\rangle$ в этих формулах обозначены нормированные базисные кет и бра векторы двух конечномерных и взаимно двойственных комплексных пространств, которые являются также собственными векторами вводимых далее операторов. Размерность этих унитарных пространств равна числу опознавательных эталонов, или числу соответствующих им и *воспринимаемых субъектом* значений E_q свойства E объекта, по которым он относится к разным категориям.

Символы $\langle \mathbf{P}_k(t) |$ и $|\mathbf{F}_q(t)\rangle$ также имеют разное значение в квантово-подобной и нейросетевой модели опознавания. В квантово-подобной модели они обозначают изменяющиеся со временем *психологические* состояния опознавательных эталонов и тестового объекта со свойством q , а в нейросетевой модели символ $\langle \mathbf{P}_k |$ описывает *физиологическое* состояние синаптического входа k -го детектора, а $|\mathbf{F}_q\rangle$ - физиологическое состояние объекта со свойством q на выходе ансамбля из двух преддетекторов. Кроме того, в нейросетевой модели говорить об определяемых нейронной сетью *физиологических* значениях свойства E , "кодируемых" направлениями выходного вектора \mathbf{F}_q ансамбля

предетекторов, тогда как в квантово-подобной модели речь идет об *осмысленно воспринимаемых субъектом* (и в этом смысле психологических) значениях данного свойства, описываемых собственными значениями соответствующего ему оператора (см. далее).

Комплексно сопряженные числа $e^{i\lambda \hat{E}_q \cdot t} = c_k(t)$ и $e^{-i\lambda \hat{E}_k \cdot t} = c_k(t)^*$ из вышеприведенных формул трактуются как зависящие от времени нормированные фазовые координаты векторов $|\mathbf{F}_q(t)\rangle$ и $\langle \mathbf{P}_k(t)|$. В квантовой физике эти числа («фазовые множители») не имеют физической интерпретации, поскольку при умножении на них «вектора состояния» микрообъекта его *физическое* состояние, проявляемое в результатах физических экспериментов, не изменяется. Однако в квантовой психологии познания указанным числам можно придать определенную психологическую интерпретацию и значение, влияющее на результаты психологических экспериментов. Для этого нужно провести различие между воспринимаемыми \hat{E}_q и воображаемыми \hat{E}_k значениями свойства E объекта.

Когда тестовые объекты предъявляются в эксперименте для их опознания, то при их восприятии выделяются воспринимаемые значения \hat{E}_q его свойства E . Вместе с тем, при ознакомлении с тестовыми объектами и инструкцией к эксперименту у испытуемого формируются и сохраняются в памяти воображаемые значения свойства E , которые обозначаются буквой \hat{E}_k . При опознании объекта его воспринимаемый признак \hat{E}_q соотносится («сличается») с воображаемыми (эталонными) признаками \hat{E}_k , которые с помощью инструкции соотнесены с двигательными ответами. Описанные отношения между признаками \hat{E}_q и \hat{E}_k , а также между \hat{E}_k и внешним ответом целенаправленно устанавливаются субъектом опознавательного действия и являются *смысловыми* (психологическими) отношениями. Они отличаются от физиологических отношений между нейронными ансамблями, участвующими в порождении этих признаков. Квантово-подобные модели познавательных действий направлены на описание механизмов установления и реализации субъектом смысловых отношений между психологическими (ощущаемыми, воображаемыми и пр.) компонентами этих действий.

Таким образом, после ознакомления с инструкцией и принятия цели опознавательного действия у испытуемого формируется система опознавательных эталонов, психологическое состояние $\Psi(t)$ которой в каждый момент времени может быть представлено суммой, или квантово-подобной суперпозицией бра-векторов $\langle \mathbf{P}_k(t)|$, описывающих состояние каждого эталона:

$$\Psi(t) = \sum_k^n \langle \mathbf{P}_k(t)| = \sum_k^n e^{-i\lambda \hat{E}_k \cdot t} \langle \mathbf{e}^k|,$$

где n – число опознавательных эталонов. Такая суперпозиция возможных состояний эталонов подобна суперпозиции состояний микрообъекта в квантовой физике. В каждый момент времени система опознавательных эталонов, при описании ее *нормированным* вектором $\Psi(t)/\sqrt{n}$, может быть обнаружена субъектом в одном из состояний $\langle \mathbf{P}_k(t)|$ с вероятностью $1/n$, равной квадрату модуля соответствующей фазовой координаты этого нормированного вектора:

$$1/n = |e^{-i\lambda \hat{E}_k \cdot t} / \sqrt{n}|^2$$

В соответствии с математическим аппаратом квантовой физики фазовые координаты векторов $\langle \mathbf{P}_k|$, т.е. числа $e^{-i\lambda \hat{E}_k \cdot t}$ трактуются в данной модели как изменяющиеся со временем собственные значения оператора $e^{-i\lambda \hat{H} \cdot t}$, который описывает временную «эволюцию» состояния *опознавательных эталонов*. Эта «эволюция» может происходить в интервале между подаваемым в момент $t_0=0$ сигналом предупреждения о показе (в момент t_1) тестового объекта и моментом времени t_3 , в который субъект отождествляет с одним из эталонов выделенный в момент t_2 перцептивный признак опознаваемого объекта. Можно сказать также, что оператор $e^{-i\lambda \hat{H} \cdot t}$ описывает динамику состояния готовности системы эталонов к ее «сличению» с перцептивным признаком тестового объекта. Такая подготовка эталонов начинается после подачи предупредительного сигнала в «нулевой» момент времени t_0 . Из этого следует, что через время t после предъявления данного сигнала состояния опознавательных эталонов описывается функцией: $\Psi(t) = e^{-i\lambda \hat{H} \cdot t} \Psi(0)$, где $\Psi(0) = \sum_k^n \langle \mathbf{e}^k|$. Поскольку производная этой функции равна:

$$d\Psi/dt = -i\lambda\hat{H} (e^{-i\lambda\hat{H}\cdot t} \Psi(0)),$$

то в дифференциальной форме закон изменения состояния системы опознавательных эталонов имеет вид:

$$d\Psi/dt = -i\lambda\hat{H} \Psi(t) = (-i/p)\hat{H} \Psi(t) \quad (1)$$

Это уравнение является аналогом уравнения Шредингера в квантовой физике, в котором буква \hat{H} обозначает энергетический оператор Гамильтона, описывающий *силовое* взаимодействие физических объектов. В квантово-подобной модели опознания буква \hat{H} обозначает оператор психологической активности субъекта, описывающий динамику его *смыслового* взаимодействия с миром на этапе подготовки опознавательных эталонов к их «сличению» с образом тестового объекта. Буква p в данном уравнении обозначает порог различения субъектом значений свойства E , который подобен постоянной Планка в квантовой физике. Уравнение 1, без установления его связей с нейросетевой моделью опознания и дифференциальным порогом p , используется в квантово-подобных моделях различных познавательных процессов (см., например, Busmeyer et al., 2012). Возможный математический (матричный) вид психологического оператора \hat{H} для некоторых процессов описан в работе (Conte et al., 2007).

После предъявления в момент t_1 тестового объекта через короткий интервал времени (около 70 мс) *субъект с помощью нейронов-детекторов* в момент t_2 обнаруживает у него *перцептивное* значение E_q свойства E . Это значение затем «сличается» с совокупностью воображаемых значений E_k свойства E , представленных в системе опознавательных эталонов. Обнаружение у объекта через 70 мс после его показа перцептивного (воспринимаемого *субъектом*, а не только его нейронами) значения свойства E можно трактовать как порождение субъектом *психо-физиологического образа* этого свойства объекта, который можно отождествить с *психологическим состоянием* q -го значения данного свойства объекта.

Это состояние, как отмечалось выше, описывается зависящим от времени комплексным кет-вектором: $|\mathbf{F}_q(t)\rangle = e^{i\lambda E_q t} |\mathbf{e}_q\rangle$. Фазовая координата ($e^{i\lambda E_q t}$) этого вектора (как и в случае эталонов) трактуется как изменяющееся со временем собственное значение оператора $e^{i\lambda\hat{H}\cdot t}$, который описывает временную «эволюцию» данного вектора:

$$|\mathbf{F}_q(t)\rangle = e^{i\lambda\hat{H}\cdot t} |\mathbf{F}_q(0)\rangle = e^{i\lambda\hat{H}\cdot t} |\mathbf{e}_q\rangle = e^{i\lambda E_q t} |\mathbf{e}_q\rangle,$$

где $|\mathbf{e}_q\rangle$ является собственным вектором оператора \hat{H} , а число E_q – его собственное значение. Эта «эволюция» психического состояния (образа) тестового объекта начинается в момент порождения данного состояния, который для него считается нулевым ($t_2 = 0$) и заканчивается в момент t_3 , когда образ объекта отождествляется с одним из опознавательных эталонов. В дифференциальной форме закон изменения психологического состояния тестового объекта в интервале времени от t_2 до t_3 описывается уравнением 2, в котором оператор \hat{H} является сопряженным к оператору \hat{H} из уравнения 1:

$$d|\mathbf{F}_q\rangle/dt = (i/p)\hat{H}|\mathbf{F}_q\rangle \quad (2)$$

В излагаемой здесь модели процесс «сличения» воспринятого и воображаемых значений свойства E соотносится с квантово-подобной редукцией вектора состояния эталонов $\Psi(t) \rightarrow \langle \mathbf{P}_q(t) |$, которая начинается в момент t_2 , когда субъект порождает перцептивное значение E_q свойства объекта. Описываемая вектором $\Psi(t)$ суперпозиция бра-векторов, возникающая в процессе ожидания тестовых объектов, после выделения перцептивного признака объекта начинает *постепенно* редуцироваться к одному из входящих в нее векторов $\langle \mathbf{P}_k(t) |$. При физических (силовых) взаимодействиях микрообъектов процесс подобной редукции их «волновой функции», или «вектора состояния» осуществляется «мгновенно». Однако в психологических (смысловых) взаимодействиях субъекта с миром этот процесс может, по-видимому, занимать некоторое время и даже отчетливо осознаваться.

Это происходит, например, при мысленном повороте зрительного образа (воспринятого состояния) опознаваемого объекта до его совмещения с одним из воображаемых эталонов, повернутых относительно объекта на некоторый угол. В наших экспериментах (Беспалов, 1984) испытуемые мысленно вращали образы двумерных геометрических фигур сразу к

«правильному» эталону, с которым этот образ мог полностью совмещаться и с которым соотнесен определенный двигательный ответ. Это означает, что они предварительно и очень быстро идентифицировали этот объект, т.е. не осознанно соотносили его с определенным эталоном на начальной стадии опознания. Этот процесс предварительной идентификации тестового объекта можно соотнести с процессом выделения его перцептивного опознавательного признака, который осуществляется с помощью опознавательных эталонов на латенции около 70 мс, о чем может свидетельствовать соответствующий пик в амплитуде вызванных потенциалов. Однако такой первичной идентификации тестового объекта не достаточно для того, чтобы дать не него вербальный или двигательный ответ, который соотнесен с воображаемым эталоном. Возникает необходимость соотнести перцептивный признак объекта с соответствующим эталоном.

Такое совмещение образа объекта с эталоном требуется, по-видимому, для того, чтобы «разрушить» или редуцировать суперпозицию эталонных состояний объекта, которая возникает на стадии ожидания возможных объектов после принятия испытуемым цели опознавательного действия. Эта редукция позволяет выделить соотнесенный с двигательным ответом эталон и требует времени, которое линейно зависит от физического угла между эталонным и тестовым объектом. Для объяснения этой зависимости, закона Хика и других результатов изучения процессов опознания объектов в хронометрических экспериментах требуется дальнейшая разработка квантово-подобных моделей как этих процессов, так и самого многофакторного хронометрического эксперимента.

Таким образом, в рассмотренной квантово-подобной модели начальных стадий опознавательного действия имеется четыре типа математических операторов: \hat{H} , \hat{H}^\dagger и две их экспоненциальные (операторные) функции $e^{i\hat{H}t}$ и $e^{-i\hat{H}t}$. Каждому воспринимаемому или воображаемому с помощью эталонов свойству E опознаваемого объекта соответствует оператор типа \hat{H} или \hat{H}^\dagger , собственные значения которых E_q и E_k описывают воспринимаемые или воображаемые (эталонные) значения данного свойства. Эти операторы являются аналогами энергетического оператора Гамильтона в квантовой физике. Они описывают активные познавательные процессы субъекта, направленные на выделение в объекте и удержание в памяти значений перцептивных, мнемических, семантических и других свойств объекта, которые являются собственными значениями этих операторов. Некоторым, не воспринимаемым одновременно свойствам объекта (например, цвету и семантике стимулов Струпа) соответствуют не коммутирующие операторы $\hat{H}_{цв}$ и $\hat{H}_{сем}$, с помощью которых могут быть, по-видимому, описаны статистические взаимодействия этих свойств, варьируемых в хронометрическом эксперименте по опознанию таких объектов. Определение математического вида операторов типа \hat{H} и \hat{H}^\dagger для конкретных психологических процессов является одной из актуальных задач квантовой психологии познания.

Литература

- Беспалов Б.И. 2014. Сферическая нейросетевая модель познавательного действия // Вестник Московского ун-та. Сер. 14. 4, 56-75. URL: <https://istina.msu.ru/profile/BespalovBI/> (дата обращения: 30.05.2017).
- Беспалов Б.И. 2010. Психофизиологическая проблема в деятельности психологии человека // Мат-лы 4-й Междунар. конф. по когнитивной науке Т. 1. 171-173. http://www.psy.msu.ru/people/bespalov/bespalov_2010.pdf
- Беспалов Б.И. 1984. Действие (психологические механизмы визуального мышления). М.: МГУ. URL: <https://istina.msu.ru/profile/BespalovBI/> (дата обращения: 30.05.2017).
- Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г. 1989. Нейроинтеллект: От нейрона к нейрокомпьютеру. М.: Наука.
- Фомин С.В., Соколов Е.Н., Вайткявичус Г.Г. 1979. Искусственные органы чувств. Моделирование сенсорных систем. М.: Наука.
- Aerts, D., Sozzo, S. 2011. Quantum structure in cognition. Why and how concepts are entangled. LNCS, 116-127.

- Aerts, D., Gabora, L. and Sozzo, S.* 2013. Concepts and their dynamics: A quantum-theoretic modeling of human thought. *Topics in Cognitive Science*, 5, 737-772
- Aerts, D., Sozzo, S.* 2011. Quantum structure in cognition: Why and how concepts are entangled. *Quantum Interaction. Lecture Notes in Computer Science*, 7052, 116-127.
- Aerts, D., Aerts, S. and Gabora, L.* 2009. Experimental evidence for quantum structure in cognition. Book series: *Lecture Notes in Computer Science*, 5494, 59-70.
- Bruza P.D., Wang Z., Busemeyer J.R.* 2015. Quantum cognition: a new theoretical approach to psychology. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 19, No. 7, 383-392.
- Busemeyer J.R., Wang Z.* 2015. What Is Quantum Cognition, and How Is It Applied to Psychology? *Current Directions in Psychological Science*. Vol. 24(3), 163-169.
- Conte E., Todarello O., Federici A., Vitiello F., Lopane M., Khrennikov A.* 2007. Some remarks on an experiment suggesting quantum like behavior of cognitive entities and formulation of an abstract quantum mechanical formalism to describe cognitive entity and its dynamics. *Chaos, Soliton and Fractals*. 31, 1076-1992. [Электронный ресурс]. URL: [arXiv:0710.5092](https://arxiv.org/abs/0710.5092) (дата обращения: 30.05.2017).
- Pothos E.M., Busemeyer J.R.* 2009. A quantum probability explanation for violations of ‘rational’ decision theory. *Proceeding the Royal of Society*. 25 March.1-8.
- Khrennikov A.* 2009. Quantum-like Description of Probabilistic Data from Shafir-Tversky Experiments: evidence of trigonometric and hyperbolic interference. *Biosystems*, 95, 179-187. [Электронный ресурс]. URL: [arXiv:0708.2993](https://arxiv.org/abs/0708.2993) (дата обращения: 30.05.2017).